

6
АУУ

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
Отделение физико-технических наук

На правах рукописи

ЕМЕЛЬЯНОВ Анатолий Петрович

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ

(Специальность 05.13.01 - техническая кибер-
нетика и теория информации)

А в т о р е ф е р а т
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Минск , 1973 г.

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
Отделение физико-технических наук

На правах рукописи

ЕМЕЛЬЯНОВ Анатолий Петрович

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ

(Специальность 05.13.01 - техническая кибер-
нетика и теория информации)

А в т о р е ф е р а т
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Минск , 1973 г.

Работа выполнена в Белорусском научно-исследовательском геологоразведочном институте
Министерства геологии СССР

Научный руководитель:
кандидат технических наук БОНДАРЕНКО Б.В.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор ЧЕГОЛИН П.М.
доктор геолого-минералогических наук, профессор
КАРАТАЕВ Г.И.

Ведущее научно-исследовательское учреждение - институт геохимии и геофизики АН БССР

Автореферат разослан " _____ " _____ 1973 г.

Защита диссертации состоится " 11 " ИЮН 1973 г.
в _____ часов на заседании Совета Отделения физико-тех-
нических наук по присуждению ученых степеней.

Адрес: Минск, ГСП, ул. Типографская 6, ИТК АН БССР

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

(к.т.н.
МАТКУШКОВ Л.П.)

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Министерства СССР

СК

Современный научно - технический прогресс в области изучения строения земной коры магнитотеллурическими методами в значительной степени определяется уровнем автоматизации процессов регистрации и анализа естественных электромагнитных полей. Несмотря на имеющиеся успехи в автоматизации проведения магнитотеллурического эксперимента, отсутствие развитой автоматизированной системы анализа зарегистрированных реализаций электромагнитного поля Земли резко снижает эффективность магнитотеллурических исследований. Это приводит, во-первых, к неэффективной загрузке экспериментальных установок, а, во-вторых, к ограничениям в постановке и своевременной коррекции экспериментов при изучении строения глубинных недр Земли. Отсюда также вытекает задержка во времени получения конечных результатов эксперимента, снижение точности обработки и, в целом, замедление темпов физических исследований.

В последние годы получены определенные результаты в автоматизации процессов обработки магнитотеллурической информации (М.Н.Бердичевский, И.А.Безрук, В.Н.Ключкин, А.В.Кохманский, А.В.Куликов, В.Б.Озеров, А.А.Ковтун, Г.Н.Ткачев, О.М.Чинарева и др.). Причем, в развитии методов анализа наряду с увеличением роли автоматизации отмечается тенденция создания алгоритмов с более совершенной логикой, позволяющих извлекать значительно большее количество информации из экспериментальных данных и тем самым более надежно определять характеристики исследуемой модели.

Физической предпосылкой применения магнитотеллурических методов для изучения глубоких горизонтов Земли является существование линейных соотношений между комплексными векторами естественного электромагнитного поля Земли. Так, в методе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) рассматриваются линейные соотношения между комплексными векторами электрического поля $E(\omega)$ и магнитного поля $H(\omega)$ в широком диапазоне частот, а соответствующая модель имеет вид:

$$\vec{E}(\omega) = \hat{Z}(\omega) \vec{H}(\omega) \quad (0.1)$$

Сведения о строении глубоких горизонтов земной коры, в принципе, получаются из анализа зависимости компонент тензорного импеданса (линейного оператора) \hat{Z} от частоты ω . Определение структуры оператора линейного преобразования являет-

ся конечной целью анализа данных магнитотеллурического эксперимента.

Возможно создание существенно различных систем анализа экспериментальной информации в зависимости от математических алгоритмов, положенных в их основу. При этом различные системы могут обеспечивать неодинаковую устойчивость определения результативных характеристик. Поскольку составляющие векторы естественного электромагнитного поля регистрируются на фоне определенных шумов, то не все преобразования, входящие в систему обработки и обеспечивающие определение магнитотеллурических параметров, могут успешно противостоять вредному искажению данных эксперимента. Поэтому одной из основных проблем автоматизации анализа экспериментальной информации, регистрируемой на фоне неустранимых помех, является создание систем алгоритмов, минимизирующих неустойчивость определения результативных параметров. Необходимость создания помехоустойчивых алгоритмов обработки вызывается также тем, что существует определенный предел точности регистрирующей аппаратуры, а также тем, что в экспериментальные данные в стадии подготовки их к статистической переработке вносятся дополнительные погрешности, связанные с квантованием, конечностью исследуемых реализаций, ограниченностью разрешающей способности математических фильтров и т.д. Таким образом, развитая автоматизированная система обработки экспериментальной информации обязательно должна содержать логическую схему, обеспечивающую максимально устойчивое определение информативных параметров.

Основной задачей, решаемой в диссертации, является разработка устойчивой системы анализа больших потоков "зашумленной" магнитотеллурической информации, позволяющей по возможности без участия человека на промежуточных стадиях оценивать исконые параметры. Эта система должна обеспечить практическую синхронность производственного эксперимента и массовой обработки полученных данных с целью оперативной коррекции проведения магнитотеллурических исследований при изучении строения земной коры. Вопросы, связанные с этой задачей, составляют главное содержание работы. Рассматриваемая система анализа магнитотеллурической информации включает в себя следующие основные этапы: перевод аналоговой информации в цифровую; частотную се-

лекцию магнитотеллурических реализаций; анализ качества отфильтрованного цифрового материала и поиск участков с полезной информацией; предварительную оценку на информативность цифровых массивов, подлежащих переработке; статистическую оценку магнитотеллурических параметров; оценку надежности рассчитанных магнитотеллурических параметров.

ГЛАВА I. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Типичные реализации естественных переменных электромагнитных полей, регистрируемые при магнитотеллурических исследованиях в частотном диапазоне $0,1-0,001$ гц, содержат на фоне шумов квазипериодические составляющие, для выделения которых в диссертации рассматривается узкополосная цифровая фильтрация, которая предполагает линейное преобразование входной реализации вида:

$$x'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau. \quad (I.1)$$

При селекции периодического сигнала необходимо, чтобы сигнал определенного периода выделялся без существенных искажений и чтобы во временной области передаточная функция $h(\tau)$ была как можно сильнее локализована. Рассматриваемая в диссертации передаточная функция характеризуется оптимальностью в том смысле, что при относительно высокой разрешающей способности затухает на сравнительно коротком временном интервале, равном примерно пробному периоду T_0 , на который настроен фильтр.

Для практических целей определенный интерес представляет устойчивость фильтра по отношению различного рода помехам (атмосферные разряды, промышленные помехи, изменения электромагнитного поля регионального характера и т.д.). Показывается, что наложение высокочастотного пилообразного возмущения на входе, по интенсивности соизмеримого с полезным сигналом, практически не сказывается на выходе. Несколько меньшей устойчивостью характеризуется фильтрация относительно длиннопериодных помех. Поэтому для исключения регионального фона предусматривается аппроксимация его тригонометрическими полиномами

с последующим вычитанием из анализируемого процесса. Использование тригонометрических полиномов в качестве аппроксимирующих функций оправдывается их ортогональностью, а также возможностью контролировать спектральный состав вычитаемого регионального фона.

В некоторых случаях при анализе магнитотеллурических процессов возникает необходимость детального изучения спектрального состава на усеченных участках реализаций. Полезным средством для выделения скрытых периодичностей является модификация гармонического анализа, позволяющего оценивать амплитуды и фазы преобладающих гармоник. В работе подробно изучается селективность метода и рассматривается частотный сдвиг, вызываемый эффектом усечения интервала разложения.

Эффективность преобразования Фурье для оценки скрытых периодичностей на усеченных реализациях может в значительной степени снизиться влиянием краевых эффектов. Краевые эффекты могут сильно исказить спектральную характеристику исследуемого процесса и вызвать в нем произвольные пики. Это влияние уменьшается введением в интегральное преобразование в качестве весовых функций множителей Ланцоша $G = \frac{\sin \frac{\pi x}{L}}{2x}$. Поскольку зарегистрированные реализации электромагнитного поля могут быть осложнены помехами, а также в связи с возможным отсутствием на локальных участках колебаний, соответствующих пробному периоду, предусмотрена оценка качества отфильтрованных значений электромагнитного поля для каждого момента квантования.

Показывается, что отношения евклидовых норм $\lambda_i = \frac{\|E\|_i}{\|H\|_i}$ должны быть заключены в пределах, определяемых сингулярными числами матрицы тензора импедансов $[\lambda_{\max}, \lambda_{\min}]$. Так как матрица Z заранее не известна, в программе предусмотрен статистический критерий отбраковки согласно неравенству:

$$|\lambda_i - \bar{\lambda}| \leq K_1 S(\lambda)$$

где $S(\lambda)$ — стандартное отклонение λ , $\bar{\lambda}$ — среднее арифметическое всех λ , K_1 — константа, зависящая от устанавливаемого интервала вероятных значений λ в масштабе среднеквадратических рассеяний $S(\lambda)$.

Фильтрация в общем случае связана с ослаблением фильтруемых полей. Поэтому дискретные значения электромагнитных полей на участках оцифровки, спектральный состав которых не нахо-

дится в полосе пропускания фильтра, после частотной селекции будут характеризоваться слабой интенсивностью или малыми нормами. Отбраковка пробных участков реализаций электромагнитного поля осуществляется согласно неравенству $\|E\|_i$ или $\|H\|_i \leq K_2$, где K_2 — константа, величина которой сопоставима с фоном помех.

Изложенная методика отбраковки является достаточно эффективным средством для исключения нерегулярных помех различной природы и выделения на реализациях участков с вариациями, частоты колебаний которых находятся в полосе пропускания математического фильтра.

ГЛАВА II. ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВОЙ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В магнитотеллурических методах существенным является наличие линейных соотношений между комплексными векторами естественных электромагнитных полей. Для определения структуры оператора линейного преобразования необходимо дополнить (0, I) независимыми преобразованиями. Полученные независимые системы линейных уравнений целесообразно объединить в одно матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} E_x^1 & E_y^1 \\ E_x^2 & E_y^2 \\ \vdots & \vdots \\ E_x^n & E_y^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_x^1 & H_y^1 \\ H_x^2 & H_y^2 \\ \vdots & \vdots \\ H_x^n & H_y^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{yx} \\ Z_{xy} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

При $n = 2$ матричное уравнение (2.1) аналогично определенной системе уравнений с двумя левыми частями. Не доказано, что среди обширного набора алгоритмов решения линейных систем существуют алгоритмы более точные или более экономные, чем метод последовательного исключения Гаусса. Поэтому в работе для определения матрицы непероопределенных линейных систем выбран этот метод. Метод Гаусса гарантирует максимальную устойчивость решений относительно ошибок округления. Однако основной источник неустойчивости заключается в том, что исходные данные регистрируются на определенном фоне помех. В этом слу-

чае значительно большая устойчивость определения магнитотеллурических параметров обеспечивается одной из модификаций метода наименьших квадратов - последовательным регрессионным анализом (А.П.Емельянов, 1970, 1972 г.г.).

Уравнение (2.1) в действительной при $n > 2$ области идентично блочному матричному уравнению:

$$\begin{bmatrix} \text{Re} E_x & | & \text{Re} E_y \\ \text{Im} E_x & | & \text{Im} E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re} H_x & \text{Re} H_y & | & -\text{Im} H_x & -\text{Im} H_y \\ \text{Im} H_x & \text{Im} H_y & | & \text{Re} H_x & \text{Re} H_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re} Z \\ \text{Im} Z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Его решение эквивалентно нахождению регрессионных уравнений вида:

$$\begin{matrix} \text{Re} E_x = \\ \text{Im} E_x = \\ \text{Re} E_y = \\ \text{Im} E_y = \end{matrix} f \left\{ \begin{matrix} \text{Re} H_x, \text{Im} H_x, \\ \text{Re} H_y, \text{Im} H_y \end{matrix} \right\} \quad (2.3)$$

В этих соотношениях компоненты магнитного поля являются независимыми переменными, компоненты электрического поля - зависимыми переменными, коэффициенты регрессии при независимых переменных являются искомыми параметрами.

Система нормальных уравнений, к которой сводится переопределенная система в методе наименьших квадратов, может быть решена методом Гаусса. Существует одно полезное свойство этого метода, которое в работе применено к регрессионной проблеме. Метод позволяет получать не только окончательное решение, но также и частные регрессионные уравнения, которые получаются на каждом шаге исключения. В результате удается определить значимость переменных на каждом этапе исключения. Незначимые переменные должны быть удалены из регрессионного уравнения прежде, чем будут добавляться дополнительные переменные. Следовательно, только значимые переменные включаются в окончательное регрессионное уравнение. В итоге последовательный регрессионный анализ позволяет оценивать коэффициенты регрессии (магнитотеллурические параметры) для переменных, вошедших в уравнение регрессии, и их стандартные ошибки. Процедура заканчивается расчетом коэффициента множественной корреляции между зависимой переменной и переменными, включенными в регрессионное уравнение.

В некоторых модификациях магнитотеллурические исследования, например, в методе теллурических токов, экспериментальная

информация фиксируется в виде геофизических карт. Изучаемые поля в этом случае можно представить в виде модели:

$$\tilde{Z}(x_i, y_i) = Z(x_i, y_i) + n(x_i, y_i) \quad (2.4)$$

где $\tilde{Z}(x_i, y_i)$ - результаты измерений поля, $Z(x_i, y_i)$ - аналитическая составляющая, $n(x_i, y_i)$ - нерегулярная, случайная компонента, x_i, y_i - координаты пунктов измерений.

Для выделения полезных геофизических сигналов, отождествляемых с аналитической составляющей, использована аппроксимация поля экспериментальных измерений полиномиальными поверхностями различного порядка. Подбор коэффициентов полинома осуществляется последовательным регрессионным анализом, для чего было осуществлено обобщение метода на двумерные реализации магнитотеллурических полей.

Разработанный алгоритм регрессионного анализа экспериментальной информации является достаточно эффективным и устойчивым средством оценки магнитотеллурических параметров. Практическое опробование показало, что погрешность в определении основных наиболее информативных магнитотеллурических параметров не превышает 10-12 %.

ГЛАВА III. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ В МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ МЕТОДАХ

Эффективность магнитотеллурических методов исследований строения земной коры в значительной степени зависит от устойчивости определения магнитотеллурических параметров, полученных при обработке зарегистрированных естественных электромагнитных процессов. Поскольку исходные данные регистрируются на фоне помех, нередко определение магнитотеллурических параметров в результате обработки экспериментальной информации становится некорректной операцией. В главе вопросы устойчивости рассматриваются на примере определения компонент тензора импедансов Z из решения уравнений $E = NZ$ с квадратной матрицей N . Результаты, справедливые для подобных систем, имеют достаточно общий характер и без особых изменений могут переноситься на переопределенные системы.

Чувствительность систем линейных уравнений к помехам в

первую очередь зависит от структуры матрицы N , причем могут быть три случая:

1. Составляющие магнитного поля (матрица N) заданы точно, а составляющие электрического поля (вектор E) заданы с некоторой неопределенностью δE . Тогда можно сказать, что относительная ошибка в определении Z определяется неравенством:

$$\frac{\|\delta Z\|}{\|Z\|} \leq \|N\| \|N^{-1}\| \frac{\|\delta E\|}{\|N\|} \quad (3.1)$$

Коэффициент пропорциональности $\|N\| \|N^{-1}\|$ называется числом обусловленности, зависящим от используемой нормы. Для евклидовой нормы имеет место соотношение:

$$\|N\| \|N^{-1}\| = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \geq 1,$$

где λ_{\max} и λ_{\min} — наибольшее и наименьшее сингулярные числа матрицы N соответственно. Неравенство (3.1) позволяет оценить верхний предел относительной погрешности решения Z , обусловленный неопределенностью вектора E . Равенство имеет место в том случае, если E растягивается матрицей N^{-1} в наименьшей степени, а δE — в наибольшей. Этот случай является самым неблагоприятным и при больших помехах может вызвать сильно искаженные решения. При $\|N\| \|N^{-1}\| = 1$ все направления матрицей N^{-1} растягиваются одинаково, и относительная погрешность решения равняется относительной погрешности левой части уравнения.

2. Вектор E задан точно, а матрица N задана с погрешностью δN . В работе показано, что

$$\frac{\|\delta Z\|}{\|Z\|} = \|N\| \|N^{-1}\| \frac{\|\delta N\|}{\|N\|} / (1 - \|N\| \|N^{-1}\| \frac{\|\delta N\|}{\|N\|}).$$

Оценка относительной погрешности решения может быть значительно упрощена, если ее записать в следующем виде:

$$\frac{\|\delta Z\|}{\|Z + \delta Z\|} \leq \|N\| \|N^{-1}\| \frac{\|\delta N\|}{\|N\|} \quad (3.2)$$

Это неравенство также свидетельствует о пропорциональности между относительной погрешностью задания матрицы N и относительной погрешностью решения.

3. На практике и матрица N , и вектор E являются результатами измерений и, следовательно, заданы с определенной погрешностью. В этом случае анализ устойчивости решения значи-

тельно усложняется. В работе показано, что как и в предыдущих двух случаях, число обусловленности является важным параметром, определяющим устойчивость оценок магнитотеллурических параметров. Но в последнем случае перспективы получения устойчивых оценок магнитотеллурических параметров резко ухудшаются. Даже для относительно хорошо обусловленных систем разброс в определении может достигать сотен процентов при задании компонент естественного электромагнитного поля с погрешностью 5-10%.

Существует еще одна грубая оценка обусловленности линейной системы $NZ = E$. Большое различие в суммах квадратов элементов матрицы N по строкам или столбцам характеризует ее плохую обусловленность. Поэтому целесообразно перед решением системы уменьшить указанное различие путем единообразного масштабирования матрицы по строкам и столбцам.

Большой интерес представляет не только общая погрешность определения вектора Z , но и распределение погрешности по компонентам этого вектора. Проще всего этот анализ выполняется в системе координат, составленной из собственных направлений матрицы $N^+ N$. Для этого обе части уравнения $NZ = E$ умножаются на эрмитово-сопряженную матрицу N^+ :

$$N^+ N Z = N^+ E$$

Матрица $N^+ N$ является эрмитовой и для нее существует ортогональный базис $\{u_i\}$, где она имеет диагональный вид Λ . В этом базисе все неизвестные компоненты вектора разъединены и при этом имеется возможность выделить компоненты, которые входят с малым весом.

Трудность решения особых систем вызывается делением на очень малые собственные значения матрицы $N^+ N$. Так, если $\lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 10$, то помеха при вычислении Z_i соответствующего λ_{\min} будет увеличена в 10 раз. Это может привести к такому искажению решения, что оно полностью потеряет практический смысл. Таким образом, $\lambda_{\max}/\lambda_{\min}$ служит критической величиной, которая решает вопрос о физической надежности строго математического решения.

Теоретические расчеты и практический опыт показывают, что системы линейных уравнений могут оказаться весьма чувствительными к погрешностям исходных данных. Это тем более справедли-

во в комплексной области. Поэтому основным недостатком прямых решений линейных систем, когда электромагнитное поле регистрируется с погрешностями, достигающими 10 %, является большая неустойчивость результатов.

В диссертации это обстоятельство иллюстрируется на практических примерах, показывающих, что даже при малых числах обусловленности системы чувствительны к возмущениям, а ошибка в решениях может достигать 100 и более процентов. В связи с этим возникает острая проблема оценки наиболее вероятных точечных значений импедансов. Для этой цели в реферируемой работе был разработан метод последовательного регрессионного анализа применительно к анализу магнитотеллурической информации. Этот метод является достаточно устойчивым средством для оценки магнитотеллурических параметров. Погрешность в определении главных компонент тензора импедансов этим методом обычно не превышает 10-12 %. Относительно высокая точность определения результирующих параметров объясняется способностью алгоритма контролировать фон помех в исходных данных, а также возможностью оценивать степень взаимозависимости (мультиколлинеарности) цифровых массивов, подлежащих статической переработке.

На практике в некоторых случаях при обработке магнитотеллурических данных приходится иметь дело с системами с отчетливо выраженными признаками вырожденности. Для анализа подобных вырожденных информационных потоков рекомендуется использовать регуляризационные принципы, теоретически обоснованные в работах академика А.Н.Тихонова. Предполагается, что обоснованная практическая реализация этих принципов может существенно повысить устойчивость оценок магнитотеллурических параметров.

ГЛАВА IV. СИСТЕМА ПРОГРАММ ДЛЯ АНАЛИЗА МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В главе приводится описание разработанной автором для ЭВМ "Минск-22" системы программ, которые позволяют автоматизировать различные этапы обработки результатов магнитотеллурического эксперимента. К ним относятся программы по изучению спектрального состава реализаций электромагнитного поля и програм-

мы по определению магнитотеллурических параметров. Кроме того, описываются две комплексные программы, автоматизирующие с той или иной полнотой практически весь процесс обработки магнитотеллурических данных от перевода первичной графической информации в цифровую форму до оценки коэффициентов линейных соотношений.

Ц и ф р о в а я ф и л ь т р а ц и я . Программа предназначена для выделения из реализаций электромагнитного поля гармоник заданной частоты. Снятие с осциллограмм ординаты каждой из зарегистрированных компонент электромагнитного поля вводятся программой в ЭВМ последовательно. Программа работает также с массивами, снятыми с помощью преобразователя диаграмм (аналог-код) типа Ф 001. Кроме того, вводится следующая необходимая информация: количество чисел в массиве, значение искомого пробного периода, шаг квантования, постоянные всех каналов. Результаты выдаются в следующем порядке: количество чисел в массиве, пробный период, шаг квантования, постоянные всех каналов. Затем поканально: результаты первой и повторной фильтрации (реальная часть), результаты первой и повторной фильтрации (мнимая часть).

В ы д е л е н и е с к р ы т ы х п е р и о д и ч н о с т е й . Программа предназначена для отыскания скрытых периодичностей интегральным преобразованием Фурье и работает с цифровыми массивами, снятыми вручную, а также при помощи преобразователя диаграмм (тип Ф 001). Как и для предыдущей программы, вводится аналогичная дополнительная информация. На печать выводятся следующие результаты: номер точки, номера осциллограмм, длина интервала в сек., количество чисел в массиве, постоянные каналов, текущий период, оценки коэффициентов $a(\omega)$, $b(\omega)$ с множителями и без множителей Ланцоша, оценки амплитуд $A(\omega)$ и фаз $\varphi(\omega)$ с множителями и без множителей Ланцоша.

Р е г р е с с и о н н ы й а н а л и з г е о ф и з и ч е с к и х п о л е й . Программа предназначена для приближения геофизических полей полиномиальными поверхностями пер-

вого, второго и третьего порядков. В качестве исходных данных вводятся последовательно значения полей в узлах геофизических карт, а также координаты узлов. Программа позволяет рассчитывать карты регионального фона первого, второго и третьего порядков и соответствующие карты остатков. Кроме того, при решении каждой из этих трех задач в качестве результатов выдаются: коэффициенты полинома, средние арифметические значения зависимых и независимых переменных, стандартные отклонения переменных полинома, стандартные ошибки полиномиальных коэффициентов, корреляционная матрица, коэффициент множественной корреляции, определяющий степень приближения расчетной поверхности геофизической карты, ошибка аппроксимации.

Система автоматической обработки данных МТЗ. Программа предназначена для комплексного автоматического анализа магнитотеллурической информации, задаваемой поканально (E_x, E_y, H_x, H_y) как в табличной форме, так и в виде графиков (осциллограмм), снимаемых с помощью преобразователя диаграмм. Кроме того, вводится дополнительная информация: количество чисел в массиве, пробный период, шаг квантования, постоянные каналов. Алгоритм программы предусматривает следующие основные операции:

а) очищенные от регионального фона реализации E_x, E_y, H_x, H_y подвергаются фильтрации, в результате которой образуются 8 цифровых массивов: $Re E_x, Im E_x, Re E_y, Im E_y, Re H_x, Im H_x, Re H_y, Im H_y$;

б) отфильтрованные массивы оцениваются на качество согласно критериям, изложенным в первой главе;

в) осуществляется оценка массивов $Re H_x, Im H_x, Re H_y, Im H_y$ на мультиколлинеарность. Для этого вычисляется определитель корреляционной матрицы этих массивов $\det R$, следующих примерно распределению χ^2 согласно

$$\chi^2 = - \left[(n-1) - \frac{1}{8} (2m+5) \right] \ln \det R \quad (4.1)$$

В случае $\chi^2 > \chi^2_{1-p}$ (χ^2_{1-p} — табличное значение для $\nu = 6$ степеней свободы и уровня значимости p) принимается гипотеза о наличии мультиколлинеарности или линейной зависимости цифровых массивов, состоящих из компонент магнитного поля;

г) рассчитываются линейные уравнения методом последовательного регрессионного анализа, изложенного в главе II. Вычисленные при значимых переменных коэффициенты регрессии являются компонентами тензора импедансов;

д) для оценки надежности определения магнитотеллурических параметров предусмотрена оценка их погрешностей и оценка коэффициента множественной корреляции. Кроме того, программа предусматривает выдачу ряда других параметров, полезных при оценке информативности цифровых массивов, участвующих в статистическом анализе экспериментальной информации: среднеарифметические значения массивов, стандартные отклонения массивов, корреляционную матрицу, обратную корреляционную матрицу.

Программа автоматической обработки плохо обусловленной магнитотеллурической информации. Программа предназначена для автоматической оценки устойчивых магнитотеллурических параметров, когда информационные потоки, подлежащие статистической переработке, близки к вырождению. Программа работает с цифровыми массивами, заданными в табличной форме и в виде графиков. В последнем случае исходные данные каждого канала оцифровываются с помощью преобразователя (аналог-код). Для работы программы вводится дополнительная информация, идентичная информации, вводимой в программу "Система автоматической обработки данных МТЗ". Алгоритм программы предусматривает следующие операции:

а) очищенные от регионального фона покомпонентные реализации электромагнитных полей подвергаются цифровой фильтрации, а для повышения помехоустойчивости из полученных 8 цифровых массивов формируется две матрицы E и H порядка $n \times 2$ и $n \times 4$, соответственно, по следующей схеме:

$Re E_x + Im E_x$	$Re E_y + Im E_y$
.	.
.	.
.	.

$$\begin{vmatrix} \operatorname{Re} H_x + j\operatorname{Im} H_x & \operatorname{Re} H_x - j\operatorname{Im} H_x & \operatorname{Re} H_y + j\operatorname{Im} H_y & \operatorname{Re} H_y - j\operatorname{Im} H_y \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{vmatrix}$$

б) составляется переопределенная система уравнений

$$HZ = E; \quad (4.2)$$

в) умножаются обе части уравнения на транспонированную матрицу H^T

$$H^T HZ = H^T E;$$

г) для оценки числа обусловленности задачи вычисляются собственные числа λ_i матрицы $H^T H$, затем $\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}}$;

д) составляется диагональная матрица и при переменном λ определяются компоненты тензора импедансов по схеме

$$Z_\lambda = (H^T H + \lambda)^{-1} H^T E \quad (4.3)$$

е) вычисляются нормы матрицы $\|H\|$ и $\|E\|$. Нормы ошибок матриц $\|\delta H\|$, $\|\delta E\|$ выбираются как 0,1, 0,05, 0,01 от соответствующих норм матриц;

ж) для каждого уровня ошибок при переменном λ вычисляется функционал

$$M = \|HZ_\lambda - E\| - \|\delta H\| \|Z_\lambda\| - \|\delta E\| \quad (4.4)$$

Z_λ выбирается из условия минимизации функционала M .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге выполненных исследований получены следующие основные результаты:

1. Показано, что вариации естественного электромагнитного поля обладают сложным спектральным составом, поэтому частотная селекция должна быть первым и необходимым этапом в общем анализе магнитотеллурических данных. Разработан метод цифровой фильтрации реализаций естественного электромагнитного поля Земли и соответствующая методика поиска участков с квазипериодическими вариациями, частоты которых находятся в полосе пропускания фильтра. Разработанный метод частотной селекции оказался эффективным средством для включения его в качестве первого этапа в автоматизированную систему анализа данных массового магнитотеллурического эксперимента. Кроме того, для изучения скрытой периодичности и детального изуче-

ния спектрального состава бухтообразных реализаций разработан метод, основанный на интегральном преобразовании Фурье.

2. Построена линейная модель обработки магнитотеллурической информации и развит систематический метод последовательного регрессионного анализа для ее идентификации. Произведено обобщение этого метода для выделения полезных сигналов из экспериментальных данных, зафиксированных в виде геофизических карт. При геологической интерпретации подобные сигналы, аппроксимируемые двумерными полиномиальными поверхностями, могут быть связаны с соответствующими структурами земной коры.

3. Выполнен анализ устойчивости определения магнитотеллурических параметров при использовании линейных методов обработки магнитотеллурической информации, зарегистрированной на фоне помех. Для этого изучена зависимость устойчивости определения магнитотеллурических параметров от точности задания исходных данных. Показана важность и возможность предварительного анализа исходных данных на вырожденность или мультиколлинеарность, что имеет большое значение для получения состоятельных и несмещенных оценок искомых параметров.

4. Проведен анализ перспектив развития методик устойчивого определения магнитотеллурических параметров при решении плохообусловленных линейных систем, встречающихся при обработке данных полевого магнитотеллурического эксперимента.

5. В качестве реализации теоретических исследований приведены две системы программ, автоматизирующие практически все этапы обработки данных МТЗ от ввода цифровых массивов в ЭВМ до расчетов компонент тензорного импеданса с оценкой их надежности. Кроме них дается описание программ, позволяющих автоматизировать отдельные процессы обработки результатов эксперимента. Приведенные программы могут быть использованы для анализа экспериментальных данных других магнитотеллурических методов.

Материалы работы доложены и обсуждены на III научной конференции молодых геологов Белоруссии, зональном симпозиуме геофизиков Белоруссии и Прибалтики, УП Всесоюзной научно-технической геофизической конференции. Кроме того диссертация обсуждалась в научно-исследовательском физическом институте ЛГУ, институте физики Земли АН СССР, ~~институте геофизики АН УССР~~, институте геохимии и геофизики.

Основные положения диссертации опубликованы
в работах:

1. А.П.Емельянов, Е.Е.Леванюк. Метод выделения скрытых периодичностей в естественных электромагнитных процессах. В сб. "Материалы третьей научной конференции молодых геологов Белоруссии". Минск, 1969 г.
2. А.П.Емельянов, Ю.Н. Кузнецов. Некоторые методы выделения скрытых периодичностей в магнитотеллурических методах. В сб. "Строение и физика глубинных недр западного региона СССР". "Наука и техника", Минск, 1969 г.
3. Ю.Н.Кузнецов, А.П.Емельянов, Л.С.Русецкая. Статистический анализ геофизических данных на территории Белорусского массива. ДАН БССР, т. XIV, № 9, 1970 г.
4. А.П.Емельянов. Линейные преобразования в вещественной области в магнитотеллурических методах. В сб. "Геофизические методы поисков и разведки нефти и газа в Припятской впадине". "Наука и техника", Минск, 1970 г.
5. А.П.Емельянов, Ю.Н.Кузнецов, Е.Е.Леванюк. Автоматизированная система обработки результатов измерений естественных электромагнитных полей. В сб. "Физика околоземного пространства и глубинных недр БССР". Минск, 1972 г.
6. А.П.Емельянов. Некоторые вопросы устойчивости обработки данных магнитотеллурических методов при изучении глубинного строения земной коры. В сб. "Физика околоземного пространства и глубинных недр БССР". Минск, 1972 г.
7. А.П.Емельянов, Ю.Н.Кузнецов, Е.Е.Леванюк. Регрессионный анализ геофизических полей. ДАН БССР, т. XVII, № 9, 1972 г.
8. А.П.Емельянов, Е.Е.Леванюк. Автоматизация анализа экспериментальной магнитотеллурической информации. В сб. "УП Всесоюзная научно-техническая геофизическая конференция, Львов, 1972 г.". М., 1972 г.

АТ 14071. Подписано к печати 19/III-1973 г.
Формат бумаги 60x84 1/32. Печ. л. 0, 75.
Тираж 120 экз. Тип. зак. 60. Бесплатно.

Отпечатано на роталпринте Института технической
кибернетики АН БССР. Минск, Типографская, 6.